

# 7. Sources de pollution

## SOURCES D'AGENTS TOXIQUES

### 1. Ponctuelles

Rejets d'agents toxiques qui ont lieu à des points précis

Ex: Effluents, cheminées et déversement accidentels.

- Identifiables
- Dispersion modélisables
- Minorité des cas

### 2. Diffuses

Nombreuses et se produisent à des fréquences irrégulières et peu prévisible

Ex: HAP (52% feux des forêts 20% poêles à bois 10% vieilles alumineries 0,1% cigarettes).

- Estimables
- Brouillard pour la dispersion
- Majorité des cas

La proportion de la contamination en provenance des sources diffuses s'avère souvent plus élevée que celle des sources ponctuelles

a- **Production d'énergie:** utilisation et gaspillage de ressources non renouvelables avec comme **conséquences de l'extraction et de la combustion du pétrole:**

- marées noires,
- pollution continentale et littorale,
- développement du transport routier,
- contamination diffuse de l'air,
- effet de photo-oxydants produits par les gaz d'échappement sur la végétation,
- chauffage urbain,
- augmentation du dioxyde de soufre  $SO_2$ .



*Dr. SIFI K.*



## b- Activités industrielles: émissions de

- **Composés minéraux:** Métaux et métalloïdes: mercure, plomb, cadmium, arsenic
- **Composés organiques:** aldéhydes, phénols, pesticides, fluorures, chlorés
- **Matières plastiques:** polyéthylène, polystyrènes, polyuréthane.

Les substances plastiques renferment souvent des **stabilisants** et autres **agents plastifiants** dont la toxicité est mal évaluée.

Rôle important dans la contamination de l'environnement par:

- les **PCB** (PolyChlorobiphényl),
- le **DDT** (Dichloro-Diphényl-Trichloro-éthane)
- le **Cadmium**



c- Diversification de l'industrie chimique:  
1000 substances nouvelles/an dont la **nocivité** et la **toxicité** sont souvent très mal connues.

d- Agriculture :  
engrais, pesticides.



## e- Pollutions anthropiques (chimiques):



perturbent les équilibres globaux avec réchauffement climatique; pluies acides de la transformation:

- des oxydes de soufre ( $\text{SO}_2$   $\text{SO}_3$ ) en acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )
- des oxydes d'azote ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ) en acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) (pH des pluies acides  $< 2,5$ ); rejet des gaz propulseurs des aérosols (CFC Chlorofluorocarbure) et impact sur la couche d'ozone.

# 8. Classification des polluants

## a. Critères et classification

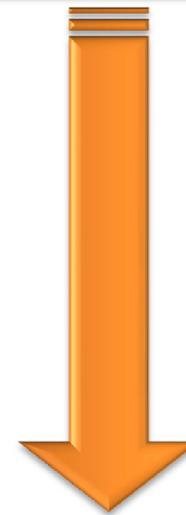
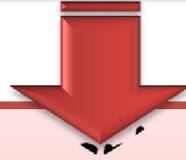
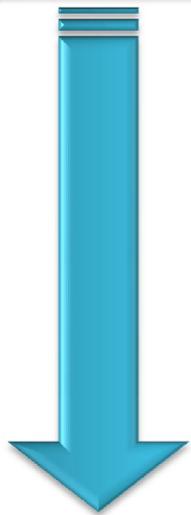
La nature des polluants est extrêmement **variée**.

Les polluants sont **disséminés** dans tous les **compartiments**: hydrosphère, atmosphère, lithosphère, biosphère.

Plusieurs critères sont à l'origine de la **classification des polluants**: **nature** ou **l'état**, la **taille** ou **l'abondance**.

La classification la plus usitée est celle de **Ramade (1977)** qui distingue :

**P O L L U A N T S**



radiations ionisantes,  
pollution thermiques,  
nucléaires

matières organiques  
mortes, agents  
pathogènes... *Dr. SIFI K.*

Une seconde classification est basée sur l'abondance naturelle

- des éléments traces (68 éléments dont la concentration individuelle est inférieure à 0,1% avec un total de 0,6% de la masse de la croûte terrestre)
- des éléments majeurs (12 éléments intervenant pour un total de 99,4%) dans la croûte terrestre.

Selon ces critères BOUCHE (2005) classe les substances toxiques en:

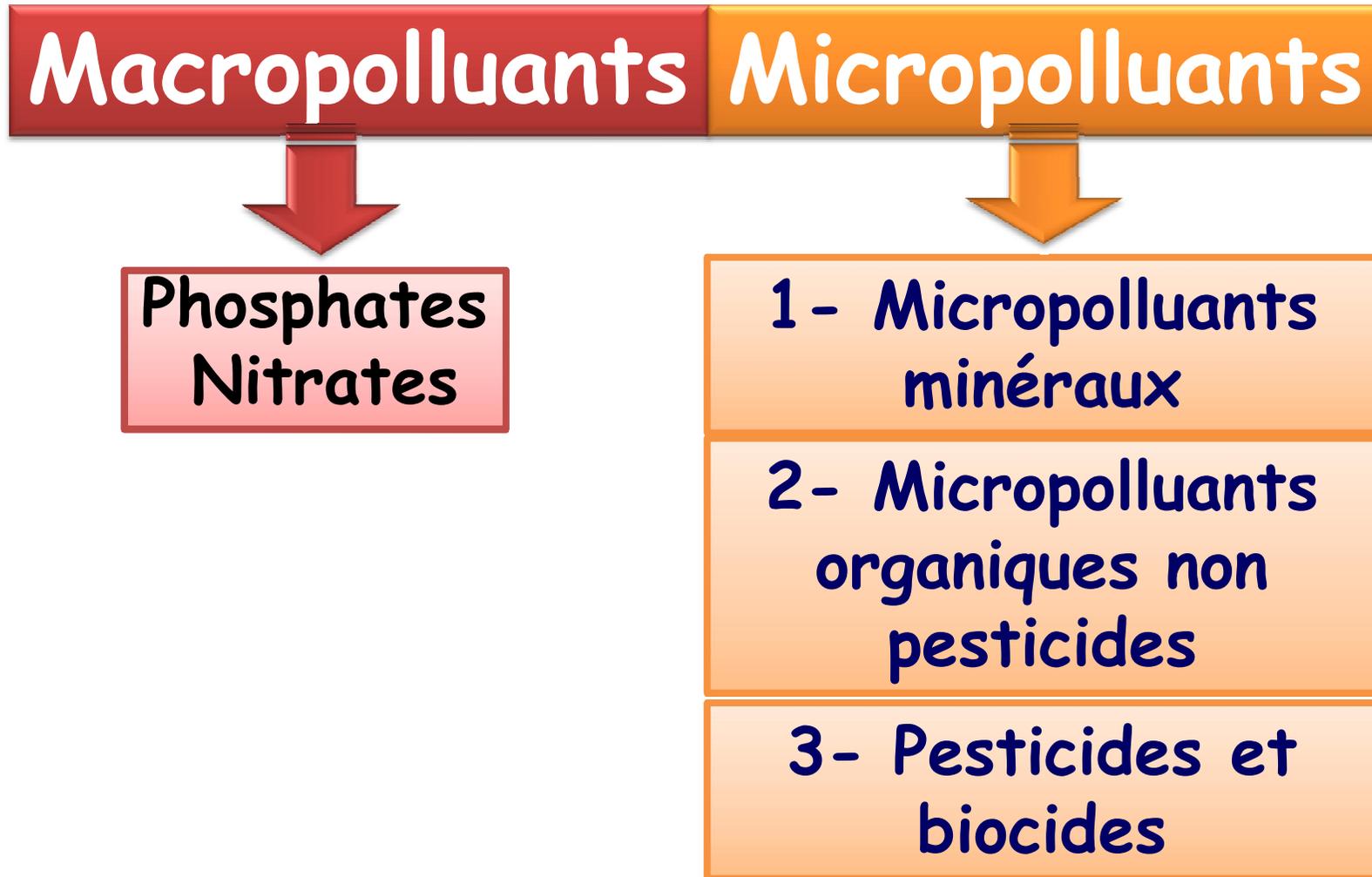
- Mégapolluants lorsque la substance considéré constitue environ 1% ou plus du sol/sédiment (masse sèche). C'est le cas de la matière organique morte qui peut dans certains cas (absence d'oxygène) être à l'origine d'effets toxiques par l'asphyxie résultant de sa décomposition.

- Macropolluants lorsque la substance considérée représente quelques ppm (mg/kg) du substrat analysé. C'est le cas des métaux lourds ou de l'ammoniaque.

- Micropolluants lorsqu'ils représentent quelques ppb ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) du substrat. C'est le cas des PCBs (PolyChloroDiphényl), HAPs (Hydrocarbures aromatiques polycycliques), dioxines, pesticides.

- Génotoxiques lorsque chaque molécule a des effets délétères comme le cas des adduits se fixant sur l'ADN et induisant des dysfonctionnements cellulaires (cancers, tératogénèse).

Une **troisième classification** simplifiée subdivise schématiquement, les polluants en **deux grands groupes**:



## 1- Micropolluants minéraux:

- Éléments traces métalliques,
- Silice, Silicates, Amiante,
- Fluorocarbone (gaz propulseur des aérosols nocif pour la couche d'ozone).

## 2- Micropolluants organiques non pesticides:

- Hydrocarbures aromatiques polycycliques et hétérocycliques.
- Paraffines chlorées.
- Aromatiques halogénés.
- Aromatiques halogénés avec oxygène.
- Aromatiques volatils.
- Amines aromatiques.

### 3- Pesticides et biocides:

- Organo-halogénés aliphatiques (lindane).
- Acides phénoxyacétiques (2,4 D).
- Cyclodiènes (Aldrine).
- Triazines.
- Carbamates (Carbaryl).
- Organo-phosphates (malathion).
- Organo-mercuriels.
- Benzoylurées.
- Benzoylhydrazine.

## b. Différences entre les macropolluants et les micropolluants:

Les micropolluants se distinguent des autres polluants par les caractéristiques suivantes:

- les **sources** des micropolluants sont le plus souvent diffuses et difficilement contrôlables.
- leur faible concentration dans les déchets (gazeux, liquides ou solides) rend leur **élimination** difficile et leur **analyse** délicate et nécessitant un ensemble de techniques particulières.
- ils **pénètrent** facilement dans l'organisme.

- ils entraînent des perturbations des écosystèmes ou des troubles métaboliques (par modification des réactions biochimiques de base telles le cycle de Krebs ou par compétition au niveau d'une fonction essentielle) chez les organismes pour des doses très faibles ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ).
- ils sont souvent peu biodégradables, s'accumulent dans l'environnement et leurs produits de dégradation peuvent être aussi dangereux que les molécules mères.

**Tableau: Comparaison d'un macropolluant (phosphates) et d'un micropolluant (PCB polychlorodiphényl).**

<b>Concentrations</b>	<b>Phosphates</b>	<b>PCB</b>
<b>Eaux d'égouts (mg/l)</b>	<b>1</b>	<b><math>0,5 \times 10^{-3}</math></b>
<b>Poissons des eaux polluées (g/kg)</b>	<b>12</b>	<b><math>5 \times 10^{-3}</math></b>
<b>Production mondiale (tonnes/an)</b>	<b><math>60 \times 10^6</math></b>	<b><math>40 \times 10^3</math></b>
<b>Quantité journalière rejetée (g/hab./j)</b>	<b>6</b>	<b><math>8 \times 10^{-4}</math></b>

## 9. Règle des trois actions polluantes:

a. Liaison aux constituants chimiques des organismes au moyen d'un groupement chimique simple:

Une substance est polluante lorsqu'elle est étrangère au milieu naturel mais qu'elle peut se lier aux constituants chimiques des organismes au moyen d'un **groupement chimique simple**.

Ainsi, sa nature étrangère au milieu **modifie les réactions biochimiques de base**.

Si le mercure métallique présente un certain danger:

- troubles du métabolisme
- déséquilibre au niveau des écosystèmes terrestres et aquatiques.

ce sont surtout:

- Sels de mercure (chlorure de mercure =  $\text{HgCl}_2$ )
- Dérivés organo-mercuriels (Méthyl-mercure =  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ ).

qui sont les plus à craindre pour la santé et l'environnement.

- Le mercure fait partie d'une famille de pesticides **organo-mercuriels** très efficaces dans la **protection des semences** contres divers **parasites** (bactéries, champignons, insectes).
- Ex. le méthyl-mercure ou le nitrate de méthyl-mercure (la liaison électrovalente leur confère une **hydrosolubilité** (entrée facile dans le milieu aquatique tandis que le **radical méthyl** leur permet de **s'insérer dans les cycles biochimiques**).
- Beaucoup de micropolluants agissent selon ce type de mécanisme.

**b. Caractéristiques réactionnelles et structurelles du polluant semblables à celles des fonctions chimiques constitutives des organismes:**

Il y a alors **compétition**. Ex: l'inhibiteur de l'**AChE**. Cette enzyme inactive un médiateur chimique l'acétylcholine qui est libéré dans l'intervalle synaptique et se fixe sur les plaques motrices du muscle provoquant l'apparition d'un potentiel d'action responsable des contractions musculaires.

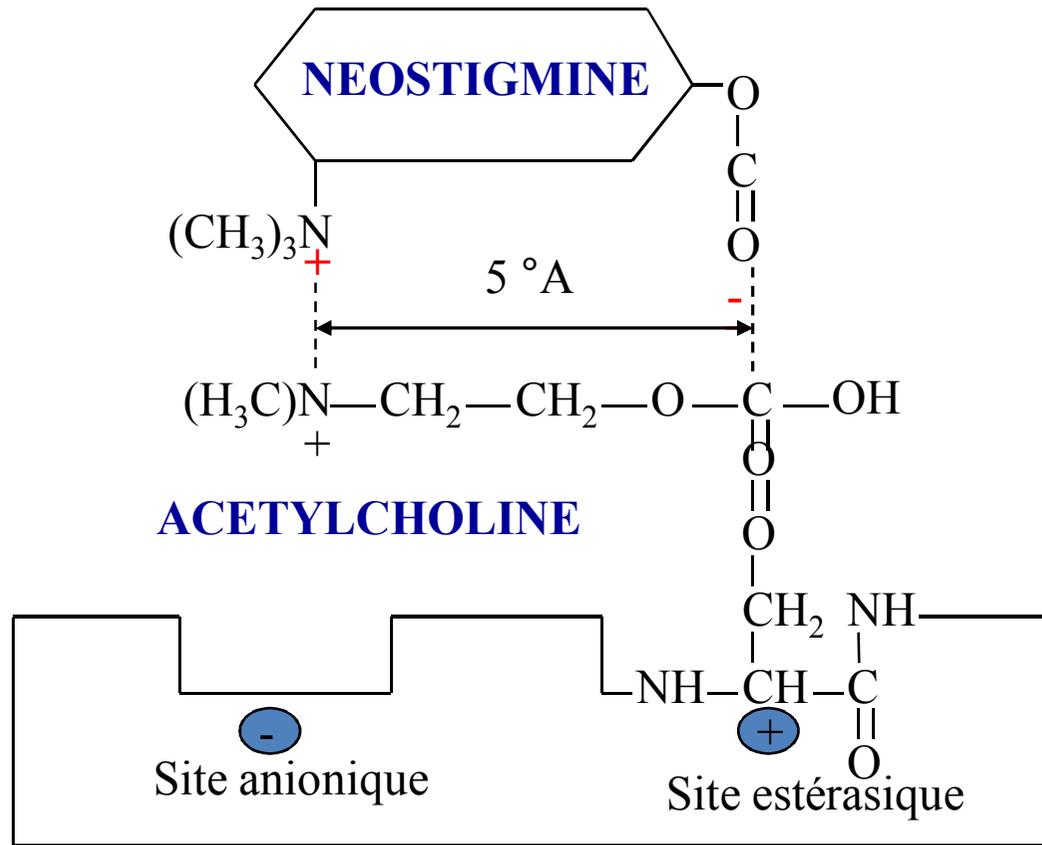
A défaut d'enzymes inactivant ce médiateur chimique, il s'établit un **blocage** de la **synapse** et une **contraction continue** des muscles aboutissant à un **état tétanique**.

**Les insecticides organophosphorés** (malathion, les esters phosphoriques de synthèse) sont de puissants inhibiteurs des acétylcholinestérases.

Ils agissent en se fixant de façon irréversible sur les sites actifs de l'enzyme. Dès lors, l'acétylcholine s'accumule dans les synapses provoquant une stimulation constante des muscles entraînant une paralysie tétanique.

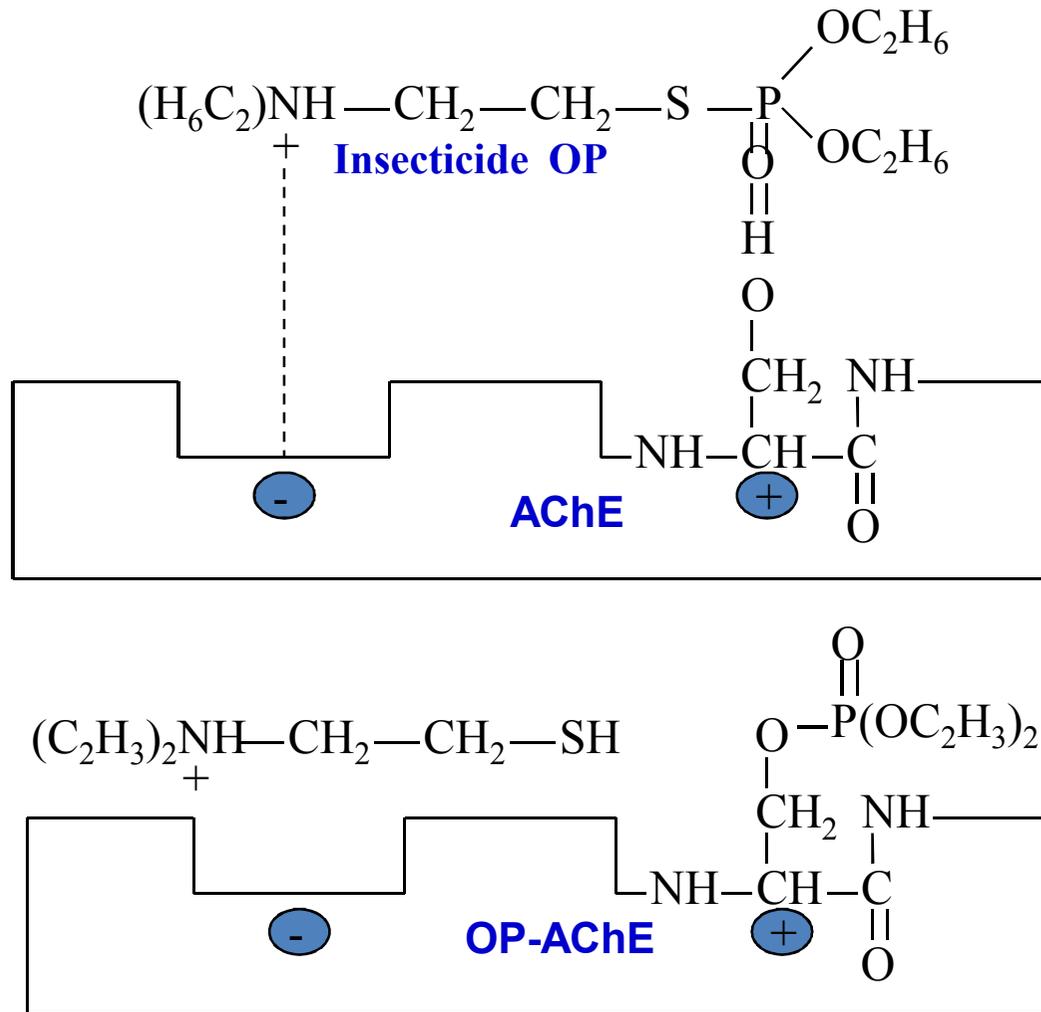
**Les insecticides organophosphorés** sont encore utilisés. Ils présentent une toxicité aiguë très élevée provoquant des troubles profonds du système nerveux suite à un blocage des acétylcholinestérases

ACETYLCHOLINESTERASE



**Fig. 11. Mode d'action des toxiques anticholinestérasiques.**

Les deux sites actifs de l'acétylcholinestérase sont séparés par une distance de  $5 \text{ \AA}$ . La même distance sépare le groupement ammonium quaternaire du groupement carboxyle dans le substrat de cet enzyme, l'acétylcholine. Tous les inhibiteurs de l'acétylcholinestérase (comme néostigmine: carbamate) possèdent également deux groupements électropositif et électronégatif séparés par une distance de  $5 \text{ \AA}$ , ce qui permet leur captation parfaite avec les sites anioniques et estérasiques de l'enzyme. *Dr. SIFI K.*



**Fig. 12. Inhibition irréversible de l'AChE**

Dans le cas des **inhibiteurs de compétition** (néostigmine: un carbamate naturel), la **liaison est réversible** après hydrolyse de celui-ci. Au contraire, avec un **inhibiteur irréversible** comme par exemple un insecticide organophosphoré, l'amiton, le **site estérasique est définitivement bloqué** après rupture hydrolytique de l'inhibiteur.

## c. Déplacement par le polluant des équilibres dans l'environnement

Le **polluant** est un composé **naturel** et un élément **essentiel**, tel le phosphore ou le zinc, dont la présence dans l'environnement en **concentration élevée** déplace les équilibres.

Ex. Le phénomène d'**eutrophisation**.

Lorsque les nutriments comme les phosphates ou les nitrates provenant des amendements agricoles ou des détergents, sont présents en **quantités très importantes** dans l'environnement aquatique, il peut y avoir un **développement excessif des producteurs**, ce qui va entraîner une consommation accrue d'oxygène.

Ce phénomène particulier de pollution est bien connu; il s'agit de l'**eutrophisation**.

# 10. Pollution des écosystèmes et évaluation

## a. Nocivité du polluant:

Elle dépend de plusieurs facteurs :

1. Nature chimique  
du polluant

2. Caractéristiques  
du milieu

3. Organisme

## Nature chimique du polluant

## Caractéristiques du milieu

Dans le cas du **mercure**,

- Les **facteurs de contamination** (les dérivés organiques ou inorganiques du mercure, les niveaux de concentrations...).
- Les **facteurs abiotiques** (pH, chlorure)

ont une influence importante dans le degré d'accessibilité du métal à la zone hydrophobe intra-lipidique et au flux transmembranaires.

# Organisme

## Organisme cible

- **La membrane biologique:** Le polluant doit franchir la membrane biologique ou se fixer sur celle-ci.
- L'action des membranes biologiques est double.
  - 1/ **Contrôler** le passage de l'extérieur vers l'intérieur de l'élément en **bloquant, ralentissant** ou **accélérant l'absorption**.
  - 2/ **Fixer préférentiellement** certains polluants de façon **transitoire** ou **définitive** en provoquant des atteintes **structurales** ou **fonctionnelles** souvent extrêmes pour la vie de la cellule.

- La nocivité du polluant dépend de la **quantité pénétrant** dans l'organisme mais aussi de la **spéciation chimique** du polluant.
- Il est important de connaître les **transformations**, la **localisation** et les **formes physico-chimiques** de l'élément dans la cellule.
- Les formes physico-chimiques peuvent être divisées en deux grandes catégories:
  - 1/ **Les formes minéralisées** relativement stables dans le temps.
  - 2/ **Les formes organiques**, labiles dans le temps.

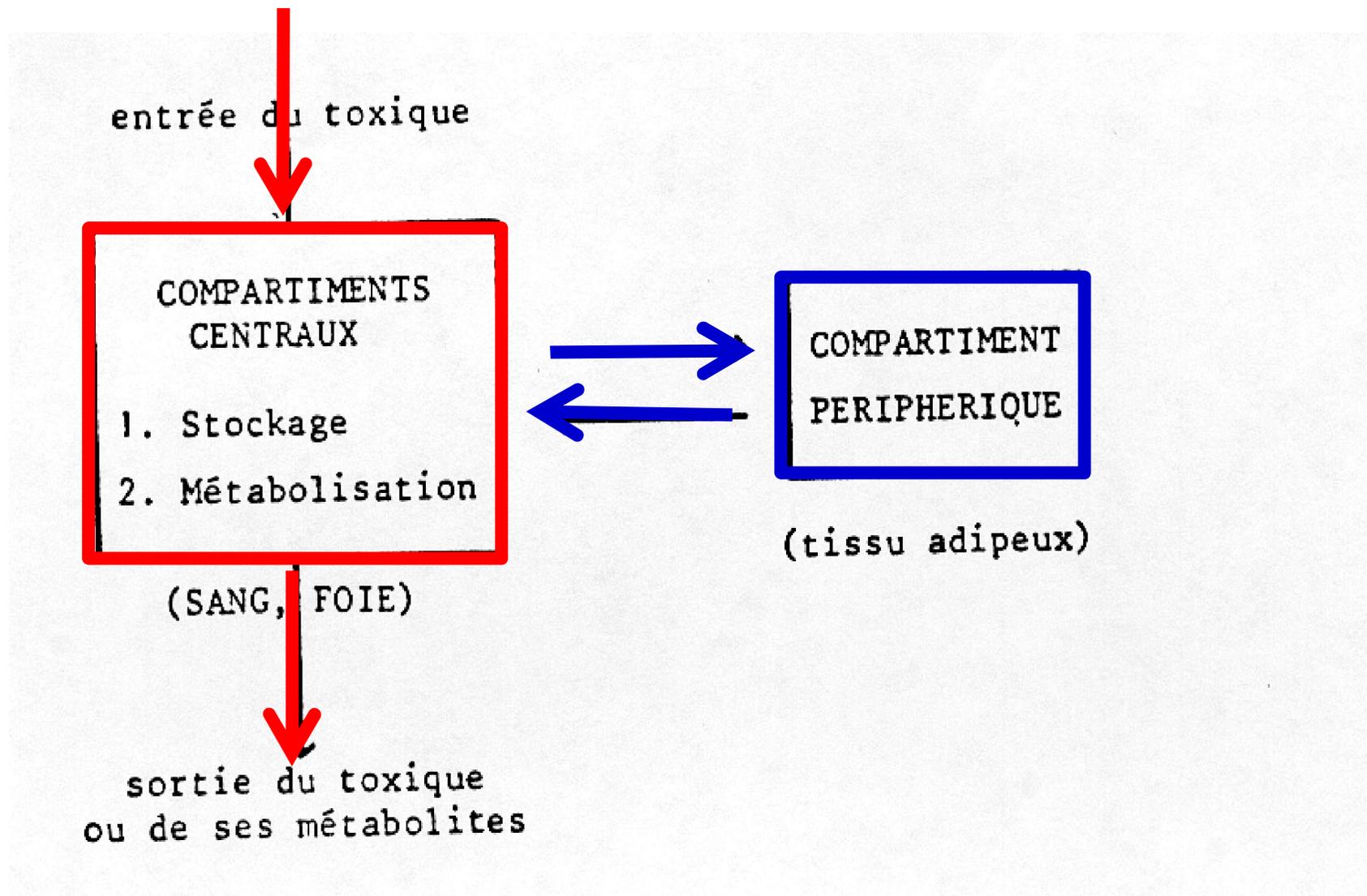


Fig. 13. Transfert des toxiques dans l'organisme

## b. Effet des polluants:

L'effet du polluant au niveau de l'organisme dépend du rôle physiologique rempli par la cellule, le tissu ou l'organe altéré par le polluant.

Ceci implique l'importance des études de la localisation du polluant dans l'organisme.

Selon la **réponse des organes** aux phases de contamination et de décontamination, on peut distinguer :

- Les **organes** receveurs et les organes donneurs.
- Les **voies** préférentielles d'entrée et de sortie des polluants.
- Les **processus cumulatifs ou limitatifs** (cumulatifs se concentre dans l'organisme tout au long de son existence, cas du Cd et Hg chez les mammifères).

L'ingestion de certains **organes de stockage** de polluants très toxiques peut présenter un risque pour le prédateur (ou l'homme qui est consommateur).

Ex. Dans les Iles Féroë (Danemark), il a été **déconseillé** aux habitants de **manger le foie et les reins d'un mammifère** qu'ils chassent, car ces organes contiennent des **quantités énormes de cadmium et de mercure** (notion d'**organotropisme** qui a un intérêt sanitaire).

La **bioaccumulation** au niveau de l'organisme sera tributaire de nombreux **facteurs** et en premier lieu de:

- **la nature de l'élément** qu'il ait un rôle biologique ou non et qu'il soit réguler ou non par l'organisme.

- **facteurs biotiques** comme le stade vital, l'âge, le sexe et l'état physiologique.

- **facteurs abiotiques** comme le degré de pollution, la saison (facteurs climatiques).

La plupart de ces **facteurs interagissent** et il est souvent difficile de faire la part de chacun.

L'étude de la **bioaccumulation** au niveau d'un organisme entier aura un triple intérêt:

- possibilité **d'effectuer des bilans** en terme de quantité.
- possibilité de quantifier le **transfert** par voie trophique.
- possibilité d'utiliser ensuite certaines **espèces comme indicatrices de la pollution** (Mollusques Bivalves, Lichens, Echinodermes...).

Chez les organismes aquatiques, la **pénétration des polluants** (dont les métaux) peut se faire

- soit **directement** par l'eau (pénétration branchiale, cutanée, digestive...).
- soit par **l'intermédiaire de la nourriture.**

La part respective des deux voies aura des conséquences sur:

- l'organotropisme.
- l'élimination (mécanisme de détoxification, métalloprotéines).
- la spéciation chimique du polluant (biodisponibilité et toxicité).

L'exposition **chronique** à des doses **sub-létales** peut induire une **tolérance** à ce polluant.

Plusieurs hypothèses ont été avancées concernant l'acquisition de la tolérance.

Les mécanismes responsables de cette tolérance sont liés:

- a. aux relations entre l'acclimatation de certaines espèces animales aux métaux et la présence dans leur organisme de métallothionéines (ou autres métalloprotéines) ou l'augmentation de la synthèse de cette protéine.
- b. à la redistribution du polluant au sein de l'organisme correspondant à un stockage au niveau de sites biochimiques moins sensibles.
- c. à la variation des capacités d'absorption et/ou d'excrétion.

## c. Evaluation des effets:

Le développement de l'industrie a entraîné une contamination de l'environnement par une quantité et une diversité croissante de substances toxiques

- d'origine industrielle (métaux lourds)
- d'origine agricole (fertilisants ou pesticides).

Les effets des polluants sont souvent peu décelables rendant ainsi leur évaluation difficile.

Trois modes d'absorption du toxique dans l'organisme :

- la voie **respiratoire** (toxicité par inhalation).
- la voie **trans-tégumentaire** (toxicité percutanée ou par contact).
- la voie **orale** (toxicité par ingestion).

La **toxicité** de ces produits s'exerce à différents niveaux de l'écosystème:

- soit sur les **proies des animaux** Vertébrés et/ou Invertébrés.
- soit sur les **constituants de leurs habitats** (herbicides).
- soit sur la **faune** elle-même (réduction de la fertilité et augmentation de la mortalité).

Plusieurs types d'effets sont induits par une contamination:

- Effets immédiats de mortalité (toxicité aiguë) sont difficiles à constater surtout quand il s'agit de fortes doses de polluants absorbées en une ou plusieurs fois.
- Effets sub-létaux (toxicité sub-létale) observés chez une population contaminée qui présente une proportion significative d'individus survivants bien que tous les individus manifestent des troubles métaboliques.
- Effets à long terme (toxicité chronique) sont plus importants et se manifestent à des doses plus faibles.

## Ex. le toluène

- Seuil de toxicité aiguë = 6,3 mg/l (tests effectués sur poissons, *Oncorhynchus kisutch*, pendant 96 heures).
- Seuil de toxicité chronique = 1,4 mg/l (tests effectués sur poissons, *Oncorhynchus kisutch*, pendant 40 jours).

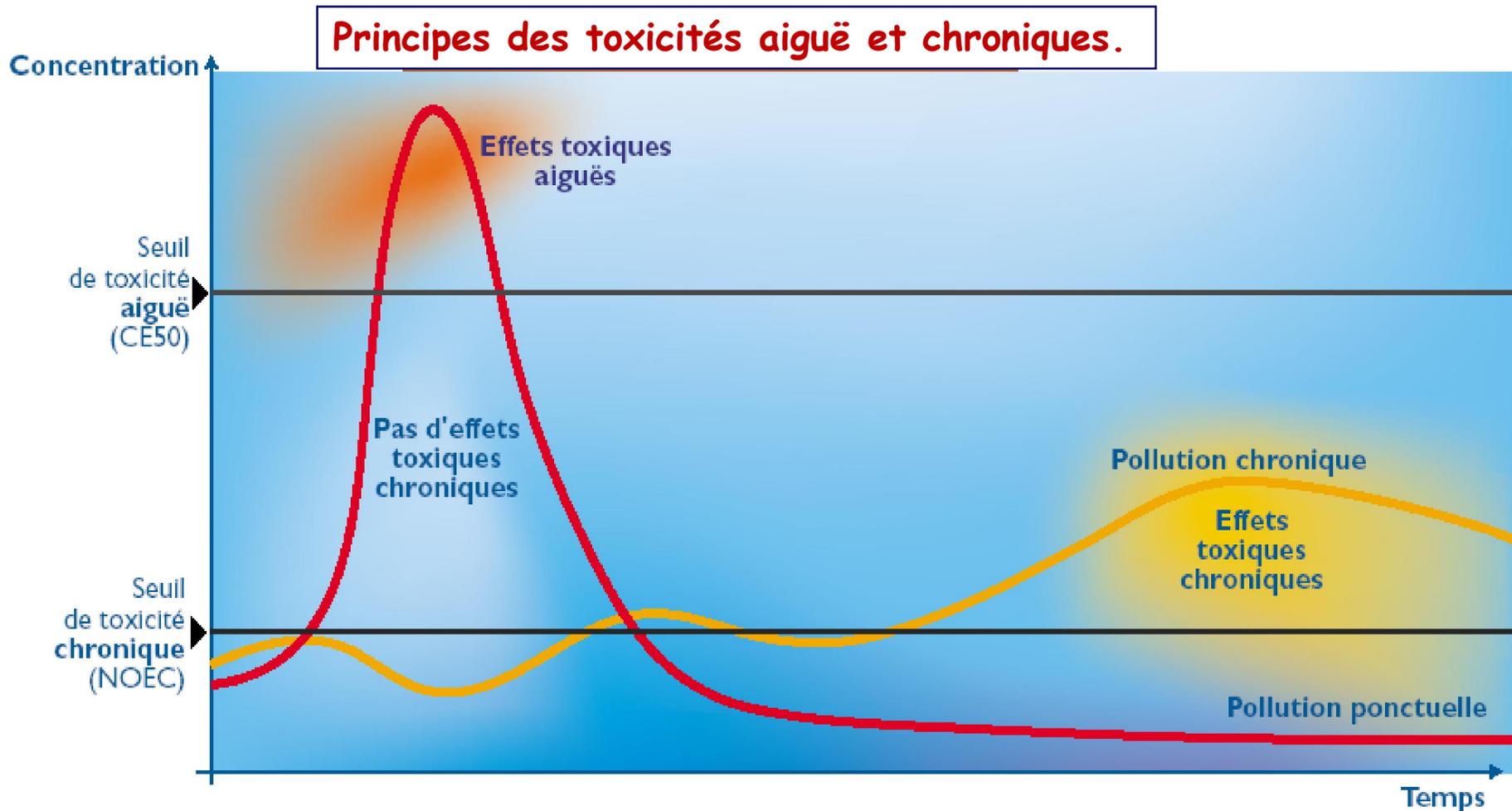


Fig. 14. Principe des toxicités aiguë et chronique.

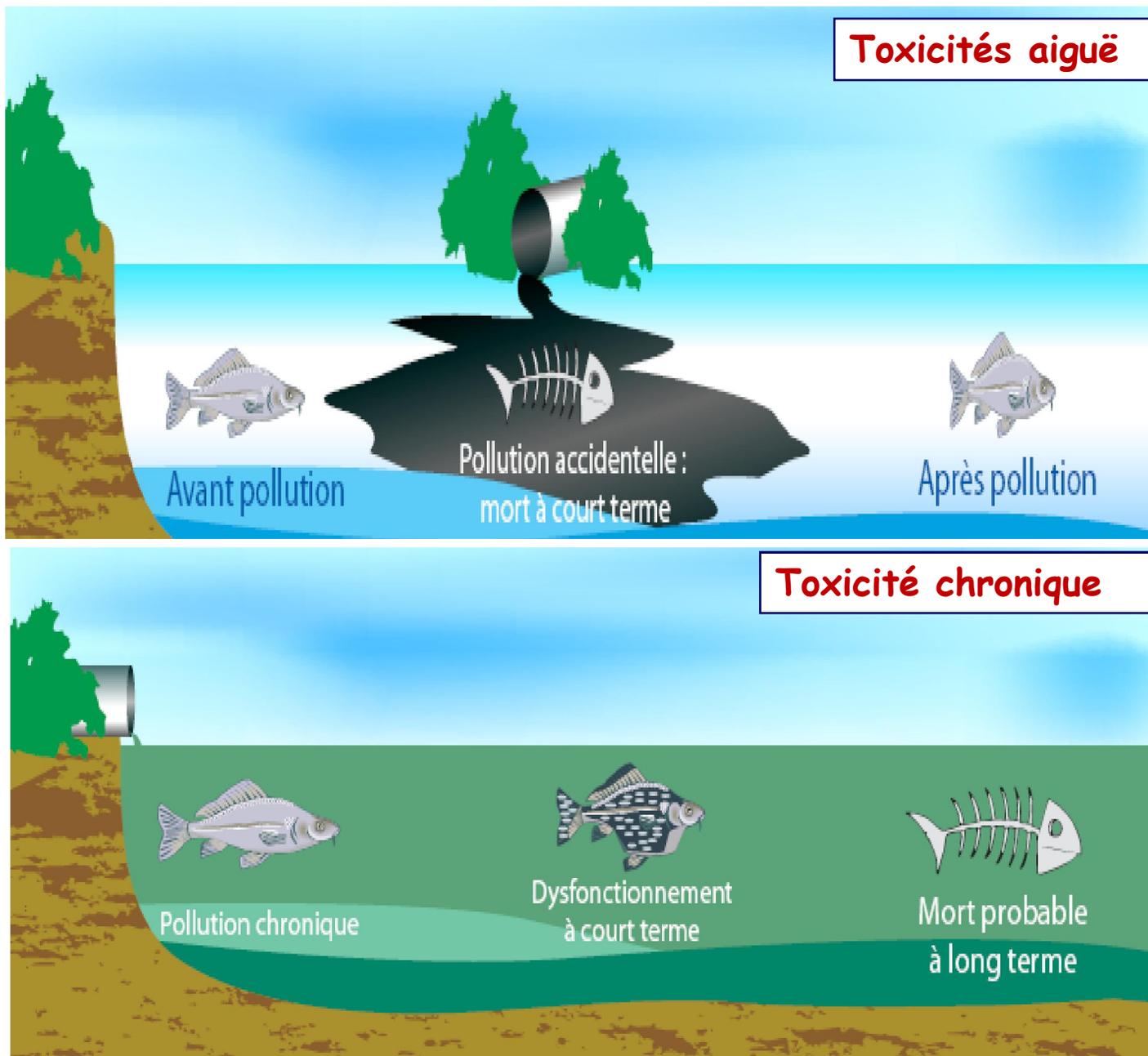


Fig. 15. Toxicités aiguë et chronique.

- Les tests d'écotoxicité sont réalisés sur des espèces sauvages ou qui peuvent servir de modèle pour ces espèces:

a- les écosystèmes terrestres, des tests de toxicité chronique (toxicité à long terme) sont réalisés sur diverses espèces d'oiseaux telles la caille japonaise (*Coturnix coturnix japonica*) qui est la plus utilisée.

b- les écosystèmes aquatiques, des tests assez nombreux ont été développés tant sur des Vertébrés, des Invertébrés que sur des végétaux.

Signalons les tests réalisés sur:

- des algues unicellulaires,
- les Daphnies

-diverses espèces de poissons appartenant aux genres *Salmo* (*S. gairdneri*) et *Brachydanio* (*B. rerio*). Ces deux espèces de poissons servent surtout dans le cadre d'étude d'impact des pesticides organochlorés.

## Relation de causalité:

Etablir les conditions expérimentales assurant la relation de causalité entre la présence d'un toxique et les effets induits

- d'une manière intentionnelle (expérimentation provoquée)

- d'une manière non intentionnelle (expérimentation accidentelle).

## 5 principaux critères d'évaluation:

- **Spécificité:** Description des signes pathologiques associés à la pathologie.
- **Force du lien entre les variables:** Les statistiques permettent une validité à la relation entre l'intensité des symptômes et les teneurs en toxique.
- **Relation d'ordre temporelle:** La causalité n'est démontré que si la cause précède l'effet.
- **Reproductibilité:** La relation cause-effet peut être retrouvée (équipes et époques différentes, protocoles variés).
- **Cohérence:** Identification d'un mécanisme plausible sur la cause responsable des effets observés.

# Létalité des organismes

**Doses et concentrations létales:** Différentes formes de toxicité (inhalation, contact, ingestion ou injection sous-cutanée ou intra-péritonéale) sont déterminées sur un échantillon de population d'une espèce animale de référence.

-**Estimation de la dose létale 50 = DL50** c-à-d la dose de toxique dans la nourriture ou l'eau qui entraîne la mort de 50% des animaux testés au terme d'une période courte d'intoxication (24, 48 ou 96 h) ou toxicité aigüe.

-Il est **possible de calculer la DL10** (marque la limite entre toxicité aigue et subaigüe) et la **DL90** (intérêt pratique dans la recherche intentionnelle de la toxicité).

- **Temps léthal:** Détermination des mortalités consécutives à l'application d'une dose constante en fonction de temps croissants.
- On en déduit le **temps léthal moyen (TL50)**, temps théorique au bout duquel doivent périr 50% des individus exposés à une teneur déterminée de toxique.
- On porte tous les points correspondants à la TL50 de chaque concentration en polluant dans l'eau sur une courbe en fonction du log des concentrations testées.
- On définit arbitrairement la **CL50** comme étant la concentration correspondant à un temps de survivance de 96 heures.